

УДК 519.688

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868

## КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

А.Н. Гаврилов, Н.В. Суханова, С.С. Рылёв

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, 394036, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: [Suhanovanv1971@mail.ru](mailto:Suhanovanv1971@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 05.07.19, принята к печати 10.08.19

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Гаврилов А.Н., Суханова Н.В., Рылёв С.С. Кинетический подход построения модели плазменных процессов синтеза углеродных наноструктур // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 862–868. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрен новый метод математического моделирования процессов синтеза углеродных наноструктур в плазме, отличающийся использованием кинетического уравнения Больцмана, и функций распределения частиц с учетом парных упругих и неупругих столкновений. Широкое использование нанотрубок, фуллеренов в современной промышленности сдерживает высокая стоимость и низкая производительность методов синтеза, которые обусловлены недостаточной теоретической изученностью процессов их формирования. Цель работы — построение модели процессов получения различных углеродных наноструктур в плазме дугового разряда и развитие эффективных численных методов для расчетов условий, позволяющих повысить эффективность синтеза. **Метод.** Представлен метод численного решения рассмотренной многомерной нелинейной задачи с применением технологии nVidia CUDA в сочетании с технологией распараллеливания на центральном и графическом процессорах, позволяющий получить экономичное решение с использованием ограниченных вычислительных ресурсов персонального компьютера. **Основные результаты.** Показано, что предложенная модель позволяет адекватно описывать процессы образования и роста кластерных групп, являющихся основой формирования углеродных наноструктур в плазме дугового разряда, а также учитывать влияние условий синтеза на выход конечного продукта. **Практическая значимость.** Разработанную математическую модель и ее элементы можно использовать при проектировании установок синтеза углеродных наноструктур методом термического испарения графита.

### Ключевые слова

углеродные наноструктуры, математическая модель, электродуговой синтез, плазма, уравнение Больцмана, метод крупных частиц, CUDA

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868

## KINETIC APPROACH OF PLASMA PROCESSES MODELING FOR SYNTHESIS OF CARBON NANOSTRUCTURES

A.N. Gavrilov, N.V. Sukhanova, S.S. Rylev

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation

Corresponding author: [Suhanovanv1971@mail.ru](mailto:Suhanovanv1971@mail.ru)

### Article info

Received 05.07.19, accepted 10.08.19

Article in Russian

**For citation:** Gavrilov A.N., Sukhanova N.V., Rylev S.S. Kinetic approach of plasma processes modeling for synthesis of carbon nanostructures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 862–868 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868

### Abstract

**Subject of Research.** We consider a new mathematical modeling method for synthesis processes of carbon nanostructures in plasma. The method is characterized by the use of the Boltzmann kinetic equation and particle distribution functions taking into account the paired elastic and inelastic collisions. The widespread use of nanotubes, fullerenes in modern industry is limited by the high cost and low productivity of synthesis methods due to insufficient theoretical study of their formation processes. The aim of the work is to build a model of the processes for obtaining various carbon nanostructures in arc discharge plasma and

the development of effective numerical methods for calculating the conditions improving the synthesis efficiency. **Method.** The paper presents a method of numerical solution of the considered multidimensional nonlinear problem with the use of nVidia CUDA technology in combination with the parallelization technology on the central and graphic processors. The method gives the possibility to obtain cost-effective solution by applying limited computing resources on a personal computer. **Main Results.** The developed model makes it possible to describe adequately the processes of formation and growth of cluster groups, which are the basis for the formation of carbon nanostructures in arc discharge plasma, and also to take into account the effect of synthesis conditions on the final product output. **Practical Relevance.** The developed mathematical model and its elements can be used in the design of plants for the synthesis of carbon nanostructures by thermal evaporation of graphite.

#### Keywords

carbon nanostructures, mathematical model, electric arc synthesis, plasma, Boltzmann equation, major particle method, CUDA

## Введение

Повышенный интерес к изучению способов получения, структуре и свойствам углеродных наноразмерных структур обусловлен многообразием их аллотропных форм, уникальностью физико-химических характеристик и перспективой практического применения. Малый размер структурных составляющих фуллеренов, нанотрубок, не превышающих обычно 100 нм, позволяет, например, использовать их в качестве армирующего материала при создании полимерных композитных материалов с новыми или улучшенными свойствами [1].

Условно все известные технологии синтеза, которые могут быть использованы для промышленного получения углеродных наноструктур (УНС), можно разделить на процессы, использующие возгонку-десублимацию графитового сырья и пиролиз углеродосодержащих газов. Каждому методу характерны свои особенности [2]. Одним из наиболее распространенных методов возгонки-десублимации является термическая возгонка графита высокой степени очистки плазмой дугового разряда в среде буферного газа (обычно He или Ar). Метод отличается тем, что при разных технологических условиях синтеза при использовании соответствующих катализаторов возможно получение многослойных, однослойных нанотрубок или фуллеренов ряда  $C_{50}$ – $C_{92}$  с высоким выходом и качеством конечного материала [3].

Исследование процессов, проходящих в плазме дугового разряда при синтезе УНС, является сложной задачей. Высокая температура, быстротечность, малая зона синтеза, большое количество разнородных частиц, одновременно присутствующих в плазме, а также различные эффекты при фазовых и структурных превращениях углерода определяют трудность моделирования объекта.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению процессов при плазменном синтезе УНС, отсутствует модель, позволяющая исследовать условия образования УНС на основе зарождения и роста кластерных групп углерода с различными типами связей в низкотемпературной плазме (4500–5500 К) с учетом их характеристик и взаимосвязей.

## Постановка задачи

Для исследования сложных ресурсоемких физических процессов синтеза различных УНС методом плазменной возгонки графитового сырья в среде буферного газа необходимо разработать математическую модель, позволяющую описать механизм формирования объемных УНС на кластерном уровне с учетом особенностей его протекания. Численное решение модели позволит уточнить представления о процессах, проходящих в низкотемпературной плазме при получении УНС, провести анализ фазовых и структурных превращений, происходящих с углеродом в многокомпонентной плазме, определить условия рациональных параметров ведения технологического процесса.

## Разработка математической модели

В процессе термического синтеза графита плазмой дугового разряда происходит ряд последовательных процессов, которые зависят от условий ведения синтеза. Для математического моделирования физических процессов в плазме возможно использование различных подходов, отличающихся уровнями иерархической детализации рассматриваемого объекта, степенью точности описания, возможностями учета специфики процесса и проблематичностью численного решения. Это одночастичное приближение, метод молекулярной динамики, магнитогидродинамическое (МГД) описание, кинетическое описание, метод Монте-Карло и шредингеровские модели [4, 5].

Применительно к электродуговому синтезу для моделирования динамики плазмы наиболее подходят два подхода разных уровней детализации: МГД теория (рассматривающая плазму, как проводящую жидкость) и кинетическая теория (оперирующая с функцией распределения заряженных частиц по координатам и импульсам). Условием применимости МГД описания является редкая плазма, в которой нет влияния заряженных частиц друг на друга и не учитываются их столкновения. Поэтому для моделирования коллективных явлений в плазме дугового разряда наиболее подходит кинетическое описание на основе уравнения Больцмана.

Систему уравнений Больцмана для каждой компоненты плазмы можно представить в виде [6]:

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{r}} - \frac{q_a}{m_a} (\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{B}]) \cdot \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{v}} = \frac{\partial f_a}{\partial t} \Big|_{\text{CT}}, \quad \alpha = e, h, c, \quad (1)$$

где  $f_a$  — функции распределения компоненты плазмы ( $e$  — электрон,  $h$  — ион буферного газа,  $c$  — ион углерода);  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля;  $\mathbf{B}$  — магнитная индукции;  $q_a, m_a$  — заряд и масса частицы;  $c$  — скорость света;  $\mathbf{v}$  — вектор поля скоростей частицы;  $\mathbf{r}$  — координаты частицы, CT — столкновения.

Принимая, что в плазме происходят упругие и неупругие столкновения между электронами, ионами буферного газа и частицами углерода во всем межэлектродном пространстве, интегралы парных столкновений в уравнениях (1) будут иметь вид [7]:

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} \Big|_{\text{CT}} = \sum_{\beta} \iint_V (f'_a f'_\beta - f_a f_\beta) |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| d\sigma d\mathbf{v}', \quad \alpha = e, h, c; \quad \beta = e, h, c, \quad (2)$$

где  $f_a, f_\beta, f'_a, f'_\beta$  — функции распределения частиц  $\alpha$  и  $\beta$  до и после столкновения частиц;  $\mathbf{v}, \mathbf{v}'$  — векторы скоростей до и после столкновения;  $d\sigma = 4R_1 R_2 \cos\theta d\Omega$  — дифференциальное эффективное сечение рассеяния частиц радиусов  $R_1$  и  $R_2$  в телесный угол  $d\Omega$ ,  $\theta$  — угол между скоростью сталкивающихся частиц и линией движения;  $V$  — объем расчетной области плазмы.

Систему уравнений (1) необходимо дополнить системой уравнений Максвелла, позволяющих описать самосогласованное поле [8].

Начальные и граничные условия полученной системы уравнений представлены в работе [9]. В процессе синтеза УНС происходит выгорание анода и образование депозитного осадка на катоде. Поэтому для формирования начальных и учета изменения граничных условий в процессе синтеза также необходимо использовать математическую модель, описывающую процесс теплообмена в рассматриваемой системе с подвижными границами [10]. В качестве функции, описывающей распределение частиц по скоростям в плазме, использовалось распределение Максвелла [11].

### Схема решения модели

Присутствие в уравнениях Больцмана (1) интеграла столкновений (2) существенно затрудняет решение предложенной математической модели, которое возможно только численным методом по схеме рис. 1.



Рис. 1. Схема решения задачи

Наличие громадного количества разнообразных частиц, одновременно участвующих в численном расчете, требует значительных компьютерных ресурсов и затрат времени. Поэтому для получения физически оправданных результатов моделирования был разработан модифицированный метод, заключающийся в использовании метода «крупных частиц» (МНК) в композиции с методом расщепления [12]. Это позволило снизить объем вычислений и требования к компьютерным ресурсам без потери точности расчетов за счет группировки однотипных частиц в более крупные (макрочастицы) [13].

С целью снижения общего времени решения обозначенных задач (рис. 1) была использована технология распараллеливания на CPU и GPU (Central Processing Unit и Graphics Processing Unit) [14, 15]. Все вычисления были выполнены на аппаратно-программном комплексе CUDA (Compute Unified Device Architecture) с применением технологии nVidia CUDA, позволяющей осуществлять программирование графического процессора [16, 17].

Одной из особенностей технологии распараллеливания на CPU и GPU является то, что не все одинаковые потоки данных, запущенные в один момент времени закончат выполнение одновременно. Поэтому был разработан алгоритм, позволяющий решать задачу синхронизации параллельных участков вычисления [18].

## Результаты и их обсуждение

Для подтверждения соответствия разработанной модели физическому процессу был выполнен ряд экспериментальных исследований синтеза УНС электродуговым методом в среде инертного газа (He) на лабораторной установке, оборудованной автоматизированной системой управления (АСУ) [19]. Использование АСУ позволило в режиме реального времени поддерживать стабильные параметры синтеза. Приведенные ниже результаты были получены без использования катализатора для режима синтеза многослойных углеродных нанотрубок (МУН) в депозитном осадке. Параметры процесса: сила тока — 150 А, напряжение 25 В, давление гелия 53,32 кПа, межэлектродное расстояние 0,001 м. Для синтеза использовались высокочистые графитовые электроды диаметром 0,012 м.

Результаты сравнения полученных экспериментальных и расчетных данных позволяют характеризовать разработанную модель, как адекватную (рис. 2).

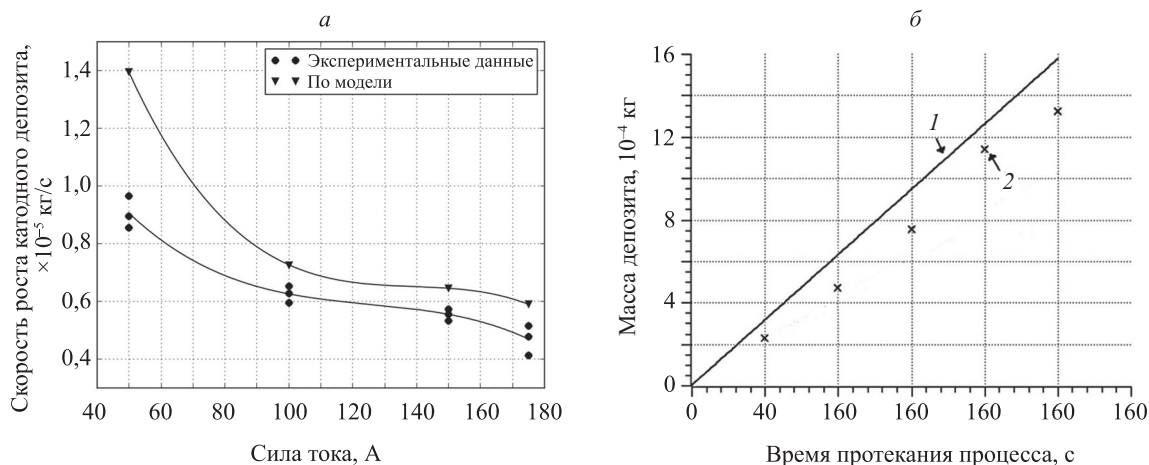


Рис. 2. *a* — изменение скорости роста катодного осадка от силы тока; *b* — изменение массы катодного депозита в режиме синтеза многослойных углеродных наноструктур от времени синтеза: 1 — по модели, 2 — экспериментальные данные

Использование функций распределения по скоростям частиц углерода, рассчитанных по модели, позволяет исследовать зоны и условия вероятного образования в плазме наибольших концентраций линейных кластерных групп со связями  $C=C-C$  ( $C_3$ ). Кластерные группы  $C_3$  являются основой построения пентагонов и гексагонов, формирующих объемные структуры фуллеренов и нанотрубок. Количество их образований в плазме непосредственно определяет выход конечного продукта. Численные расчеты ( $\Delta t = 360$  нс, где  $\Delta t$  — промежуток времени) количества образований устойчивых кластерных групп  $C_3$  по длине межэлектродного пространства плазмы были выполнены для двух кардинально различных режимов синтеза [6, 7]: МУН в депозите (режим нанотрубки) и сажи, осаждающейся на стенках камеры, содержащей фуллерены (режим фуллерены) (рис. 3).

Анализ результатов показывает, что образование кластеров  $C_3$  в рассматриваемых режимах синтеза происходит по-разному. Это объясняется различными параметрами электромагнитных полей, ускоряющих частицы, температурой плазмы и отличающимися начальными скоростями частиц. Количество образований  $C_3$  на всем интервале различно, но наибольшее их число отмечается вблизи электродов межэлектродного пространства. На количество столкновений влияет концентрация частиц, их скорость и размер. В плазме на начальном этапе возгонки графита с анода имеется наибольшее количество частиц с относительно невысокой скоростью, что дает большое число столкновений, часть из которых приводит к образованию связей и укрупнению частиц. При движении частиц от анода к катоду их число уменьшается из-за образования кластеров, уменьшается концентрация частиц, что приводит к уменьшению общего числа столкновений и столкновений с образованием связей. Далее уже более крупные частицы разгоняются электромагнитным полем, что приводит к увеличению общего числа столкновений в прикатодной области, а следовательно, и количества образующихся связей. Влияние основных параметров синтеза на количество образований в плазме кластерных групп типа  $C_3$  представлено на рис. 4.

Согласно выполненным исследованиям, наибольшее число образований  $C_3$  происходит при напряжении на электродах  $U = 20-30$  В и плотности тока  $j = 1,33 \cdot 10^6 - 3,17 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с экспериментальными данными и данными, полученными другими авторами [20]. Разработанная модель также позволяет исследовать влияние параметров синтеза на образование катодного депозита. Зависимости скорости роста депозита от силы тока при различных видах и давлениях буферного газа в камере представлены на рис. 5.

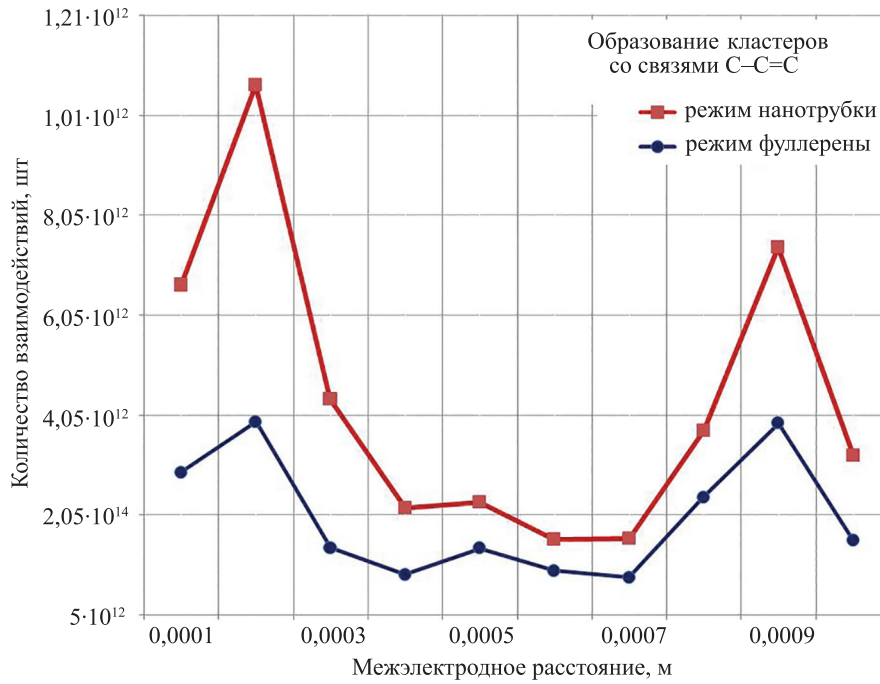


Рис. 3. Зависимости количественных характеристик образования кластеров C<sub>3</sub> по длине межэлектродного пространства для режима нанотрубки (сила тока I = 150 А) и режима фуллерены (сила тока I = 350 А)

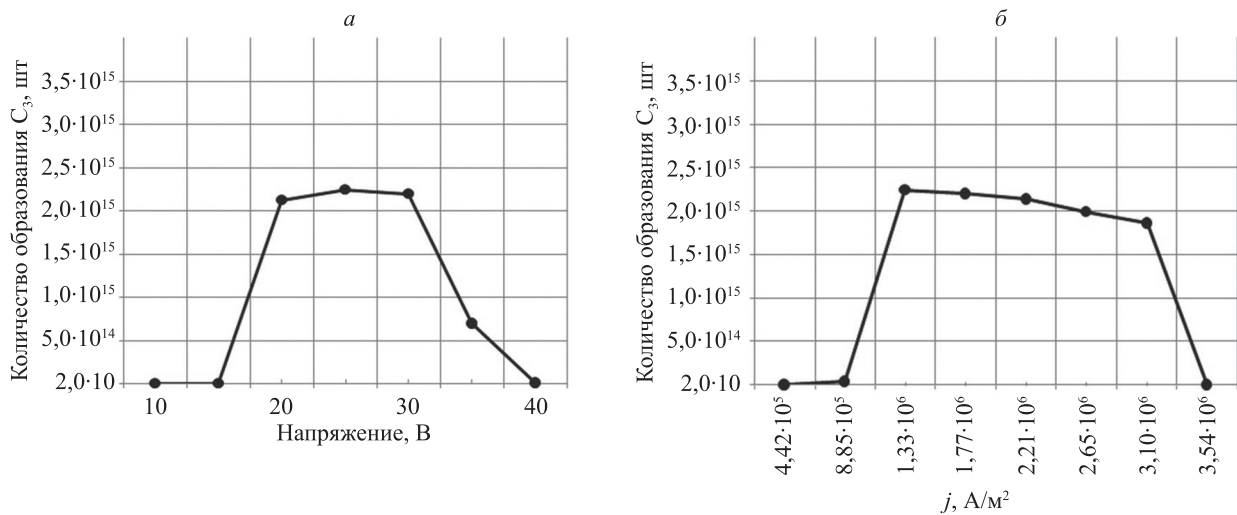


Рис. 4. а — изменение количества C<sub>3</sub> от напряжения на электродах за Δt = 360 нс; б — изменение количества C<sub>3</sub> от плотности тока за Δt = 360 нс

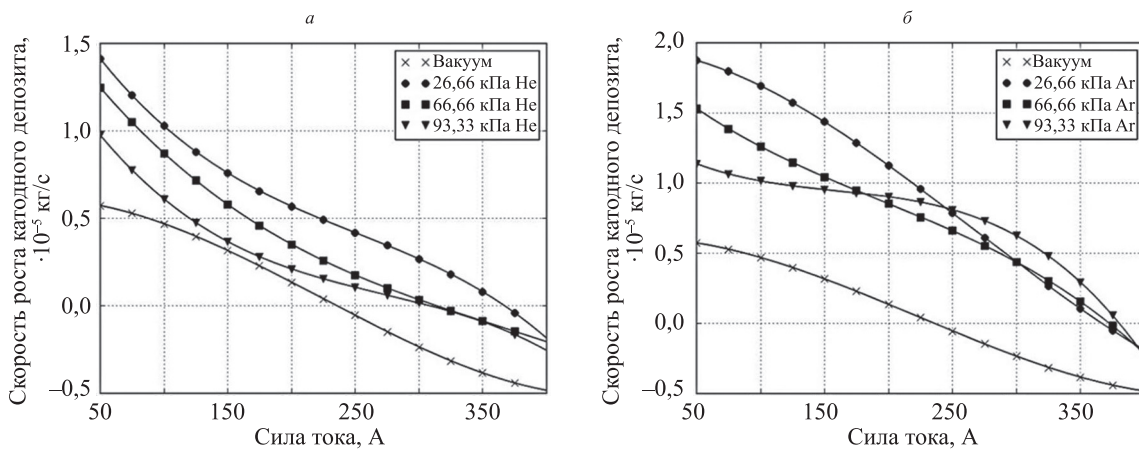


Рис. 5. Скорость роста катодного депозита в атмосфере: He (а), Ar (б)

Скорость роста катодного депозита в среде Ne значительно отличается от Ar. Использование Ar в качестве буферной среды увеличивает скорость роста депозита при одинаковых параметрах синтеза по сравнению с Ne. Анализ выполненных численных расчетов подтверждают экспериментальные исследования. Процесс синтеза при высоких токах идет без образования депозитного осадка. Отсутствие буферной среды в рабочей зоне, а также при давлениях (Ne, Ar) меньше 9,33 кПа не приводит к образованию УНС, а ведет к разрушению катода при высоких токах и осаждению на стенках камеры сажи с примесью модифицированного графита.

## Заключение

В данной работе представлен подход построения математической модели на основе кинетического уравнения Больцмана с учетом парных столкновений частиц в низкотемпературной плазме для проектирования систем синтеза углеродных наноструктур методом плазменной возгонки графита. Представленная методика численного решения рассмотренной многомерной нелинейной задачи с применением технологии nVidia CUDA в сочетании с технологией распараллеливания на центральном и графическом процессорах позволяет получить экономичное решение на персональном компьютере. Исследования по модели позволяют определить условия максимального количества образований в плазме кластерных групп C–C=C, формирующих углеродные наноструктуры, и влияние основных параметров процесса синтеза (силы тока, напряжения, давления и вида буферного газа) на выход конечного продукта.

Разработанную математическую модель и ее элементы можно использовать при проектировании установок синтеза углеродных наноструктур методом термического испарения графита.

## Литература

1. Ткачев А.Г., Мележик А.В., Дьячкова Т.П., Блохин А.Н., Буракова Е.А., Паско Т.В. Углеродные наноматериалы серии «Таунит»: производство и применение // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 4. С. 55–59.
2. Гаврилов А.Н., Пологно Е.А., Рязанов А.Н. Анализ методов синтеза и промышленное производство углеродных нанотрубок // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2010. № 6. С. 14–19.
3. Дутлов А.Е., Некрасов В.М., Сергеев А.Г., Бубнов В.П., Кареев И.Е. Электродуговой синтез сажи с высоким содержанием высших фуллеренов в «параллельной дуге» // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 12. С. 99–103. doi: 10.21883/jtf.2016.12.43922.1644
4. Зинченко Л.А., Шахнов В.А. Особенности математического моделирования в задачах проектирования наносистем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 4. С. 84–92.
5. Норман Г.Э., Стегайлов В.В. Стохастическая теория метода классической молекулярной динамики // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 6. С. 3–44.
6. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Tolstova I.S., Ivashin A.L. Formation of clusters of carbon structures in plasma under thermal destruction of graphite // Nanotechnologies in Russia. 2017. V. 12. N 3-4. P. 139–146. doi: 10.1134/S1995078017020021
7. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н. Математические методы исследования кинетики формирования кластеров углерода в плазме // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28. № 2. С. 116–127. doi: 10.14357/08696527180209
8. Abramov G.V., Gavrilov A.N. The application of the large particles method of numerical modeling of the process of carbonic nanostructures synthesis in plasma // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 973. P. 012022. doi: 10.1088/1742-6596/973/1/012022
9. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Татаркин Е.С. Моделирование процесса формирования кластеров углерода в плазме термического распыления графита // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2011. № 2. С. 5–8.
10. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Пологно Е.А. Численное решение задачи теплопереноса с подвижными границами при дуговом синтезе углеродных нанотрубок // Вестник Воронежской государственной технологической академии. 2010. № 2(44). С. 9–14.
11. Хир К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы. Москва: Мир, 1976. 600 с.
12. Гаврилов А.Н. Моделирование формирования УНС в плазме с использованием параллельных вычислений // Вестник ВГУ.

## References

1. Tkachev A.G., Melezhik A.V., Dyachkova T.P., Blokhin A.N., Burakova E.A., Pasko T.V. Carbon nanomaterials of “Taunit” series: production and application. *Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2013, vol. 56, no. 4, pp. 55–59. (in Russian)
2. Gavrilov A.N., Pologno E.A., Ryzanov A.N. Analysis of methods of synthesis and industrial production of carbon nanotubes. *FES: Finance. Economy. Strategy*, 2010, no. 6, pp. 14–19. (in Russian)
3. Dutlov A.E., Nekrasov V.M., Sergeev A.G., Bubnov V.P., Kareev I.E. Electric-arc synthesis of soot with high content of higher fullerenes in parallel arc. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 12, pp. 1856–1860. doi: 10.1134/S1063784216120100
4. Zinchenko L.A., Shakhnov V.A. Peculiarities of mathematical modeling in the problems of designing nano-systems. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2009, no. 4, pp. 84–92. (in Russian)
5. Norman G.E., Stegailov V.V. Stochastic theory of the classical molecular dynamics method. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 305–333.
6. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Tolstova I.S., Ivashin A.L. Formation of clusters of carbon structures in plasma under thermal destruction of graphite. *Nanotechnologies in Russia*, 2017, vol. 12, no. 3-4, pp. 139–146. doi: 10.1134/S1995078017020021
7. Abramov G.V., Gavrilov A.N. Mathematical methods for studying the kinetics of formation of carbon clusters in plasma. *Systems and means of Informatics*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 116–127. (in Russian). doi: 10.14357/08696527180209
8. Abramov G.V., Gavrilov A.N. The application of the large particles method of numerical modeling of the process of carbonic nanostructures synthesis in plasma. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 973, pp. 012022. doi: 10.1088/1742-6596/973/1/012022
9. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Tatarkin E.S. Simulation of carbon clusters formation in the plasma by graphite thermal spraying. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2011, no. 2, pp. 5–8. (in Russian)
10. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Pologno E.A. Numerical solution of heat transfer with moving boundaries in the arc synthesis of carbon nanotubes. *Bulletin of the Voronezh state technological Academy*, 2010, no. 2(44), pp. 9–14. (in Russian)
11. Heer C.V. *Statistical mechanics, kinetic theory, and stochastic processes*. New York, London, Academic Press, 1972, 618 p.
12. Gavrilov A.N. Simulation of formation of carbon nanostructures in low-temperature plasma using parallel calculations. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems anal-*

- Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 14–21.
13. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Ивашин А.Л., Толстова И.С. Использование параллельных вычислений в ресурсоемких задачах моделирования процессов движения и взаимодействия частиц в плазме при синтезе углеродных наноструктур // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2018. № 5. С. 4–14. doi: 10.18698/1812-3368-2018-5-4-14
  14. Bastrakov S., Meyerov I., Surmin I., Efimenko E., Gonoskov A., Malyshev A., Shiryayev M. Particle-in-cell plasma simulation on CPUs, GPUs and Xeon Phi coprocessors // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014. V. 8488. P. 513–514.
  15. Kim H., Vuduc R., Bagsorkhi S. Performance analysis and tuning for general purpose graphics processing units (GPGPU). Morgan & Claypool Publishers, 2012. 96 p. (Synthesis Lectures on Computer Architecture; V. 20). doi: 10.2200/S00451ED1V01Y201209CAC020
  16. Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров. М.: ДМК Пресс, 2011. 232 с.
  17. Cheng J., Grossman M., McKercher T. *Professional CUDA C programming*. N.-Y.: Wrox, 2014. 528 p.
  18. Abramov G., Gavrilov A., Ivashin A., Tolstova I. Modeling of the motion and interaction of carbon particles in the plasma electric arc discharge using parallel programming technologies // *Proc. 8<sup>th</sup> International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC 2017)*. 2017. P. 67–72.
  19. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н. Автоматизированная система управления синтезом углеродных наноструктур в плазме дугового разряда // *Автоматизация. Современные технологии*. 2016. № 3. С. 10–14.
  20. Ying L.S., Salleh A., Yusoff H.M., Rashid S.A., Razak J.A. Continuous production of carbon nanotubes – A review // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2011. V. 17. N 3. P. 367–376. doi: 10.1016/j.jiec.2011.05.007
  21. *ysis and information technologies*, 2018, no. 2, pp. 14–21. (in Russian)
  22. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Ivashin A.L., Tolstova I.S. Using parallel computing in computationally intensive problems of simulating particle motion and interaction in plasma during carbon nanostructure synthesis. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2018, vol. 80, no. 5, pp. 4–14. (in Russian). doi: 10.18698/1812-3368-2018-5-4-14
  23. Bastrakov S., Meyerov I., Surmin I., Efimenko E., Gonoskov A., Malyshev A., Shiryayev M. Particle-in-cell plasma simulation on CPUs, GPUs and Xeon Phi coprocessors. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8488, pp. 513–514.
  24. Kim H., Vuduc R., Bagsorkhi S. *Performance analysis and tuning for general purpose graphics processing units (GPGPU)*. Morgan & Claypool Publishers, 2012, 96 p. (Synthesis Lectures on Computer Architecture, vol. 20). doi: 10.2200/S00451ED1V01Y201209CAC020
  25. Sanders J., Kandrot E. *CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming*. Addison-Wesley Professional, 2011, 212 p.
  26. Cheng J., Grossman M., McKercher T. *Professional CUDA C programming*. N.-Y., Wrox, 2014, 528 p.
  27. Abramov G., Gavrilov A., Ivashin A., Tolstova I. Modeling of the motion and interaction of carbon particles in the plasma electric arc discharge using parallel programming technologies. *Proc. 8<sup>th</sup> International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics (IMCIC 2017)*, 2017, pp. 67–72.
  28. Abramov G.V., Gavrilov A.N. Automatic control system of the carbon nanostructures synthesis in the arc discharge plasma. *Automation. Modern technology*, 2016, no. 3, pp. 10–14. (in Russian)
  29. Ying L.S., Salleh A., Yusoff H.M., Rashid S.A., Razak J.A. Continuous production of carbon nanotubes – A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 367–376. doi: 10.1016/j.jiec.2011.05.007

#### Авторы

**Гаврилов Александр Николаевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, 394036, Российская Федерация, Scopus ID: 57197517965, ORCID ID: 0000-0003-1907-458X, ganinvrn@yandex.ru

**Суханова Наталья Валентиновна** — кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, 394036, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3210-7879, Suhanovanv1971@mail.ru

**Рылёв Сергей Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, 394036, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0402-251X, rozopt@mail.ru

#### Authors

**Alexander N. Gavrilov** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation, Scopus ID: 57197517965, ORCID ID: 0000-0003-1907-458X, ganinvrn@yandex.ru

**Natalia V. Sukhanova** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3210-7879, Suhanovanv1971@mail.ru

**Sergey S. Rylev** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0402-251X, rozopt@mail.ru